

## HAVA PARÇALAMALI YAKIT-HAVA PÜSKÜRTÜCÜLÜ GAZ TÜRBİNİ YANMA ODASI TASARIM METODOLOJİSİ

Ahmet Topal\*  
Tusaş Motor Sanayii A.Ş.,  
Eskişehir

Sıtkı Uslu†  
TOBB ETÜ,  
Ankara

Önder Turan‡  
Anadolu Üniversitesi,  
Eskişehir

### ÖZET

*Gaz türbini yanma odası içermiş olduğu birçok karmaşık olgu nedeniyle birçok tasarım parametresi barındırmakta ve bu bakımdan doğrulanmış bir tasarım yöntemine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma kapsamında; bir hava parçalı yakıt-hava püskürtücülü yanma odasının tasarım, üretim ve performans testleri üzerinden gaz türbini yanma odasına ait tasarım metodolojisi sunulacaktır. 90 pound itkiye sahip bir turbojet motor için tasarım yöntemi anlatılan yanma odasında sırasıyla kavramsal tasarım, ön tasarım, detay tasarım, üretim ve test fazları açıklanacaktır. Bu sayede yanma odasının tasarım çevrimi tam olarak tanımlanacaktır. Makale kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi-TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş işbirliği ve T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı desteği ile 00564.STZ.2010-1 kodlu, “Küçük Bir Turbojet Motor için Hava Parçalı Yakıt-Hava Püskürtücülü Yanma Odası Geliştirme” adlı SANTEZ projesi kapsamında yapılmıştır.*

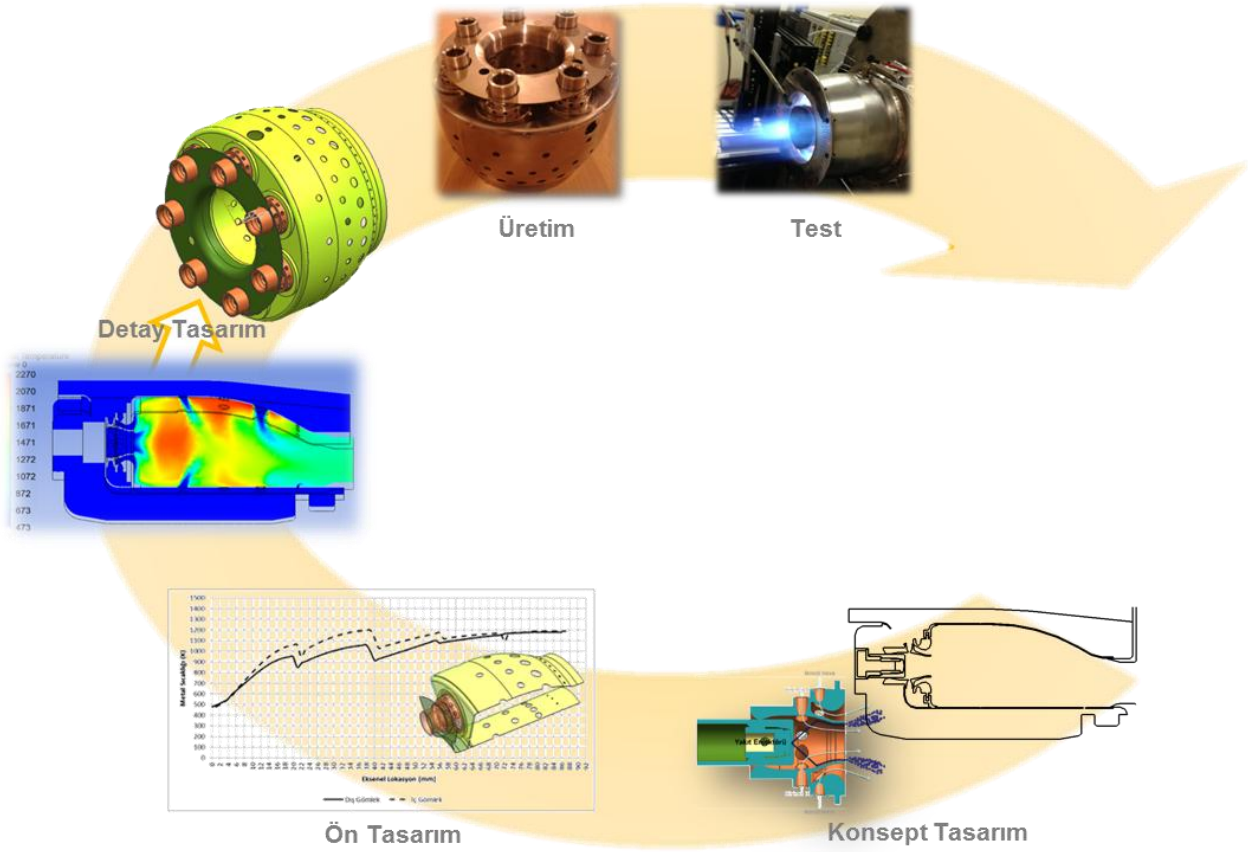
### GİRİŞ

Kavramsal tasarım, ön tasarım, detay tasarım, üretim ve test fazlarına sahip yanma odasında çok fazla tasarım parametresi bulunmaktadır. Bu nedenle sonuca ulaşabilmek, başlangıçtan bitişe iyi bir tasarım sistematiği ile mümkün olabilmektedir. Tasarımın başarısı ve minimum maliyetle sonuçlandırılabilmesi açısından her bir tasarım evresinin başarısı önemli bir etken olarak değerlendirilmelidir. Tasarım sürecinde birçok geri besleme oluşmakta ve bu geri beslemeler bir sonraki tasarım çalışması için tecrübe olarak birikmektedir. Doğrulanmış tasarımsal ve deneysel yöntemler motor projelerinde belirlenen tasarım hedeflerine ulaşabilmek için kritik öneme sahiptir. En iyi mühendislik çalışması dahi kötü bir kavramsal tasarımı düzeltmeyecektir [Pugh, 1990]. Bu bakımdan tasarımın ilk fazları olan kavramsal tasarım ve ön tasarım süreci en kritik süreçlerdendir. Kavramsal tasarım ve ön tasarım hesaplarının gerçekçi olması detay tasarım çalışmalarını önemli derecede azaltacaktır. Bu sayede proje maliyetlerinde önemli derecede avantaj sağlanabilecektir. Detay tasarım ve testlerde elde edilen verilerin kavramsal ve ön tasarım süreçlerine geri beslenmesiyle bu süreçlerin optimizasyonu sağlanarak daha etkin yaklaşımlar oluşturulabilmektedir. Kavramsal tasarımdan teste giden sürecin temel adımları Şekil 1’de verilmiştir.

\* Uzman, E-posta: ahmet.topal@tei.com.tr

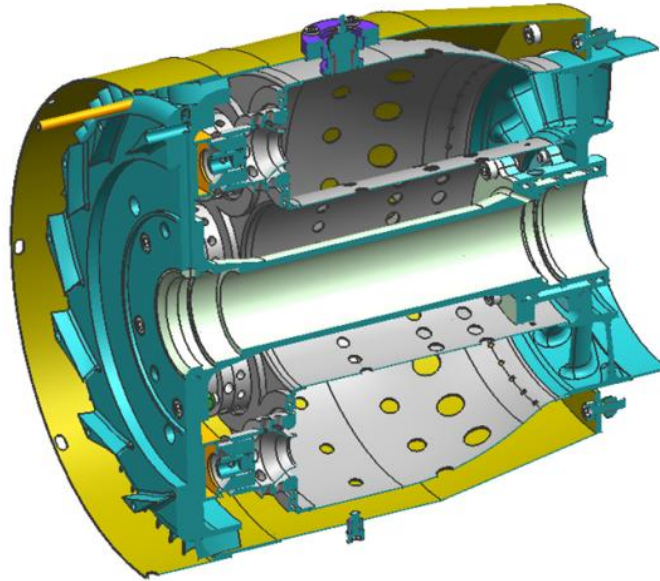
† Yrd. Doç. Dr., Makina Müh. Böl., E-posta: suslu@etu.edu.tr

‡ Doç. Dr., E-posta: onderturan@anadolu.edu.tr



Şekil 1: Genel tasarım çevrimi

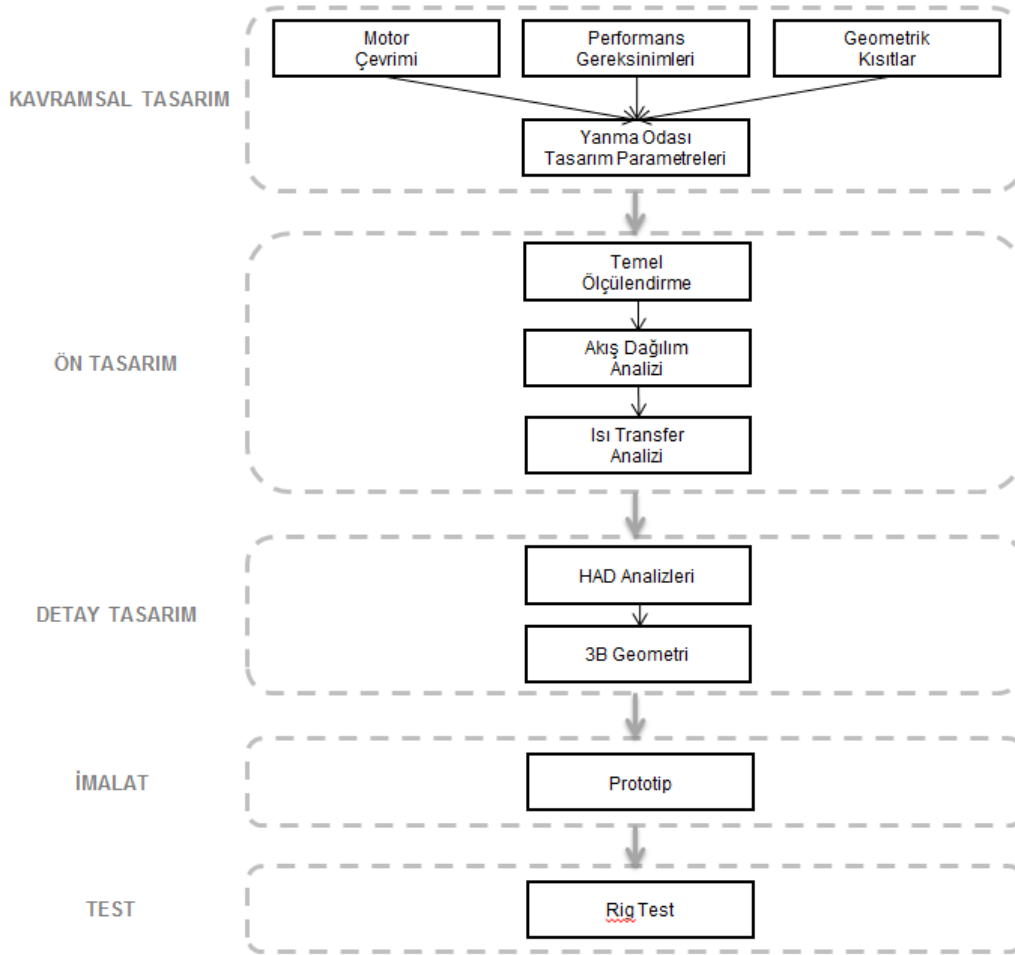
Tipik bir yanma odası kesit görüntüsü ise Şekil 2'de verilmektedir. Buradan da görülebileceği üzere yanma odası difüzör, hava parçalayıcı atomizer, alev tüpü ve mahfaza temel parçalarından meydana gelmektedir.



Şekil 2: Tipik gaz türbini yanma odası

## YÖNTEM

Yanma odası tasarımında izlenen temel adımlar Şekil 3' de verilmektedir. Bu süreç haritasından da görülebileceği üzere her bir tasarım adımının bir sonraki adımla direk olarak bağlantısı bulunmaktadır. Kavramsal tasarım sürecinde motor çevrimi, performans gereksinimleri ve geometrik kısıtlar tanımlanmakta ve buna bağlı olarak tasarım parametreleri belirlenmektedir. Belirlenen performans kriterlerini sağlayacak şekilde yanma odası mimarisi (yanma odası tipi, difüzör, ateşleme sistemi, yakıt sistemi v.b.) tanımlanarak tasarım parametreleri oluşturulmaktadır. Kavramsal tasarım sürecini takiben ön tasarım hesaplamaları ile yanma odasının temel ölçülendirilmesi üzerinden bir boyutlu akış ve ısı transfer analizleri ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri öncesi yanma odasının akış yolu yaklaşık olarak tanımlanmış olur. HAD hesaplamaları, ön tasarım fazında belirlenen yanma odası geometrisinin performans hedefleri çerçevesinde eniyileştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak gelişen HAD hesaplamaları ve yüksek performanslı bilgisayar altyapılarına rağmen yanma odası tasarım sürecinde test evresi halen çok önemli bir konuma sahiptir. Yanma odasının motora entegrasyonu ve motor testleri öncesi, rig testlerle performans karakterizasyonu gerçekleştirilerek HAD analizlerinde elde edilen performans değerleri irdelenmekte, gerekli görüldüğü hallerde iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.



Şekil 3: Yanma odası tasarım süreci

### Kavramsal ve Ön Tasarım

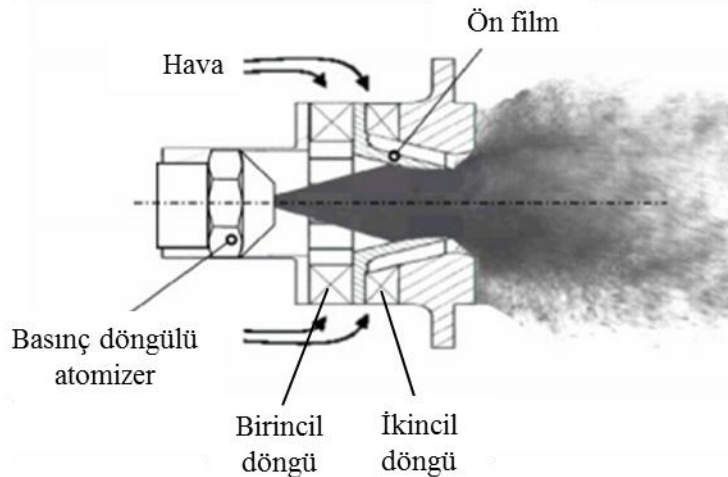
Yanma odası tasarım sürecinde ilk ve en temel adım kavramsal ve ön tasarım evreleri yani akış yolu tasarımıdır. Motordan gelen çevrim parametreleri, performans parametreleri ve geometrik kısıtlar dikkate alınarak yanma odasının mimarisi ve tasarım kriterleri seçilmektedir. Motor mimarilerine bağlı olarak farklı yanma odası tipleri bulunmakla birlikte günümüzde en yaygın kullanılan yanma odaları düz akışlı halka, ters akışlı halka ve slinger tipleridir. Bunun yanında

difüzör, yakıt besleme ve ateşleme tipleri kavramsal tasarımda belirlenerek sabitlenmesi gereken noktalardır. Genel olarak bir yanma odasında beklenen performans kriterleri aşağıdaki maddelerle tanımlanabilir [Badarinath,1993].

- Tüm çalışma koşullarında yüksek verim
- Düşük basınç kaybı
- Yerde ve havada (yeniden ateşleme) sorunsuz ateşleme
- Tüm operasyon koşullarında maksimum alev kararlılığı
- Türbin tasarım gereksinimlerini karşılayan çıkış sıcaklık profilleri (OTDF ve RTDF)
- Tüm çalışma koşullarında minimum emisyon oluşumu
- Minimum boyut, ağırlık ve imalat maliyeti
- Uzun bakım aralığı periyodu
- Farklı yakıtlarla çalışabilirlik

Kompresör ve türbin modülleri tarafından çevrelenmiş olan yanma odasına dikte edilen tasarımsal kısıtlar sürekli gelişim göstermektedir. Geçen yarım yüzyılda yanma odası giriş basıncı 5'den 50 atmosfere, giriş sıcaklığı 450'den 1000 K değerine ve çıkış sıcaklıkları 1100'den 2000 K mertebesine çıkmıştır [Lefebvre, 1999]. Tüm bu yenilenen isterler yanma odası tasarım süreçlerindeki gelişimi de zorunlu kılmaktadır.

Farklı yakıt besleme sistemlerine sahip yanma odalarında günümüzde en yaygın kullanılan yöntem hava parçalamalı (air-blast) atomizerlerdir. Bu yakıt besleme sisteminde akan havanın kinetik enerjisi sayesinde yakıt jeti önce ligamentlere sonrasında da damlacıklara parçalanmakta ve alev tütünün içine beslenmektedir. Şu an servisteki hava-parçalamalı atomizerlerin çoğunluğu ön-film oluşumlu konfigürasyonlardır. Bu atomizerde yakıt öncelikle bir katı yüzey üzerinde ince, sürekli bir film olarak yayılır ve sonrasında yüksek hızlı havanın etkisiyle ligamentlere parçalanır [Lefebvre, 1999]. Hava parçalamalı atomizerin genel yapısı Şekil 4'de verilmektedir.



Şekil 4: Hava parçalamalı atomizerin genel yapısı

Kavramsal tasarım parametrelerinin netleştirilmesi sonrası ön tasarım çalışmaları akış yolu ölçülendirilmesi ile başlamaktadır. Bu boyutlandırma; yükleme, ısıl yoğunluk, kalış süresi gibi temel parametreler dikkate alınarak performans hedeflerini sağlayabilecek minimum yanma odası hacmi oluşturulmaya çalışılmaktadır. Performans parametrelerinin dikkatli seçilmesi motor çevrimi için önem arz etmektedir. Bunun yanında, çıkış sıcaklık profili gibi bazı parametreler yanma odasının ilişkili olduğu bileşenler tarafından tanımlanmaktadır. Üzerinde çalışılan temel performans parametreleri şunlardır;

- Yanma verimi
- Basınç düşümü
- Yanma odası çıkış sıcaklık profili
- Metal sıcaklığı
- Zengin ve fakir karışım sönme limitleri

**Yanma verimi:** Verim değeri denklem (1)'de gösterildiği üzere yanma odasındaki sıcaklık artışına bağlı olarak hesaplanabileceği gibi, Denklem (2)'deki haliyle yanma odası çıkışındaki CO ve yanmamış hidrokarbon (UHC) miktarı üzerinden de değerlendirilebilmektedir [SAE Aerospace, Aerospace Recommended Practice, 2004].

$$\eta_c = \frac{\Delta T_{3-4}}{\Delta T_{3-4,teorik}} \quad (1)$$

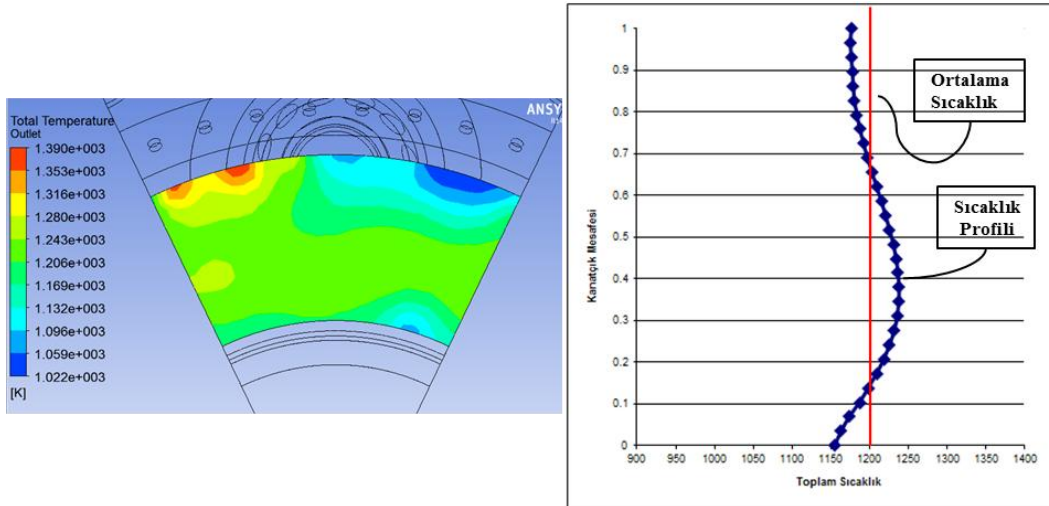
$$\eta_c = \left( 1.00 - 10109 \cdot \frac{EI_{CO}}{LHV} - \frac{EI_{CxHy}}{1000} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

**Basınç düşümü:** Yanma odası basınç düşümü genel olarak kompresör çıkışı ile türbin girişi arasındaki toplam basınç kaybını ifade etmektedir. Yanma odası basınç düşümünde gerçekleşen % 1'lik bir artış motor performansına % 0.5-1.0 arası bir özgül yakıt tüketimi olarak yansımaktadır [Sanborn]. Basınç düşümü genel olarak % 2-8 arasında olmakla beraber [Boyce], günümüzde bu değer, motor performans gereksinimlerine bağlı olarak % 2-3'lere kadar gerilemiştir.

**Yanma odası çıkış sıcaklık profili:** OTDF (Overall Temperature Distribution Factor) ve RTDF (Radial Temperature Distribution Factor) terimleriyle tanımlanan yanma odası çıkışındaki sıcaklık dağılımı, türbin ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Parametrelerin tanımı, sırasıyla denklem (3) ve denklem (4) ile verilmiştir. Şekil 5'de halka tipi bir yanma odası çıkışındaki dairesel ve radyal sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Yanma odası tasarımlarında genel olarak OTDF değerinin 0.30 altında olması istenilmektedir. Radyal profilde ise türbin kanatçığının ortalarında maksimum sıcaklık görülmesi arzu edilmektedir [Murthy, 1988].

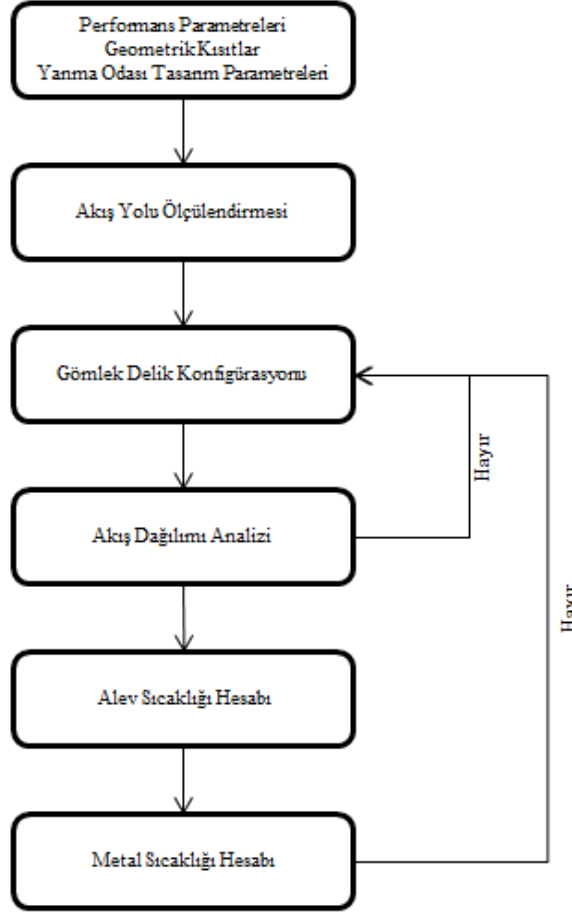
$$OTDF = \frac{T_{04,max} - T_{04}}{T_{04} - T_{03}} \quad (3)$$

$$RTDF = \frac{T_{04,r max} - T_{04}}{T_{04} - T_{03}} \quad (4)$$

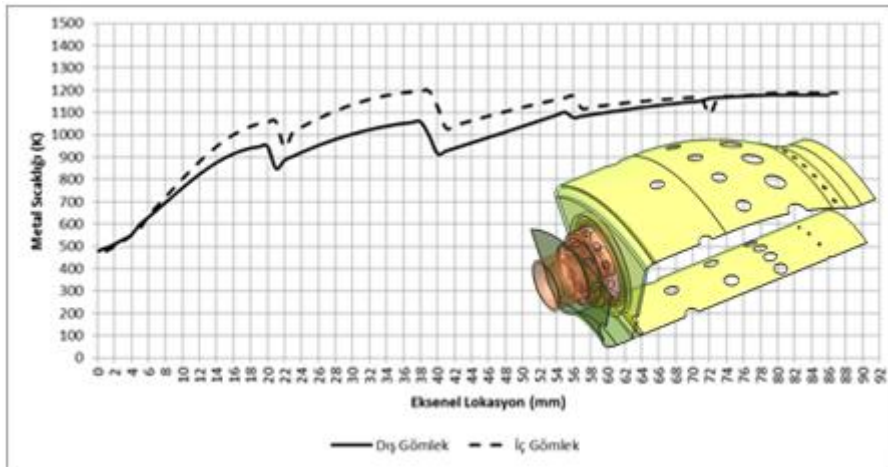


Şekil 5: Yanma odası çıkış sıcaklık dağılımı

Temel ölçülerin belirlenmesi sonrası yanma odası delik konfigürasyonu, akış dağılım ve ısı transferi analizlerine bağlı olarak şekillendirilir (Şekil 6). Yanma odasının bir boyutlu ısı transfer analizlerine bağlı olarak iç ve dış gömleklerdeki ısı transfer dağılımı incelenerek, kavramsal tasarım fazında belirlenen performans kriterini sağlayacak şekilde tasarımda iyileştirmeler yapılmaktadır. Tasarımı yapılan yanma odasının metal sıcaklık dağılımı Şekil 7'de görülebilmektedir.



Şekil 6: Yanma odası akış yolu tasarımı süreci

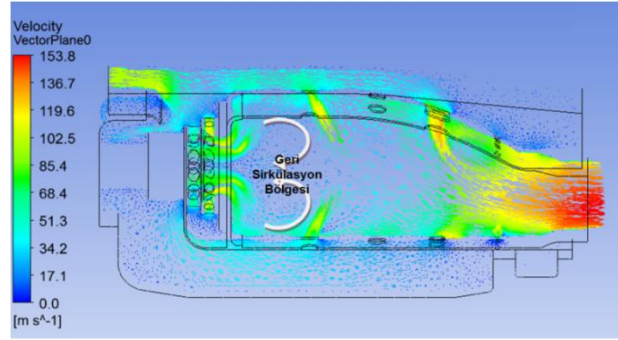


Şekil 7: Yanma odası duvar sıcaklık dağılımı

## Detay Tasarım

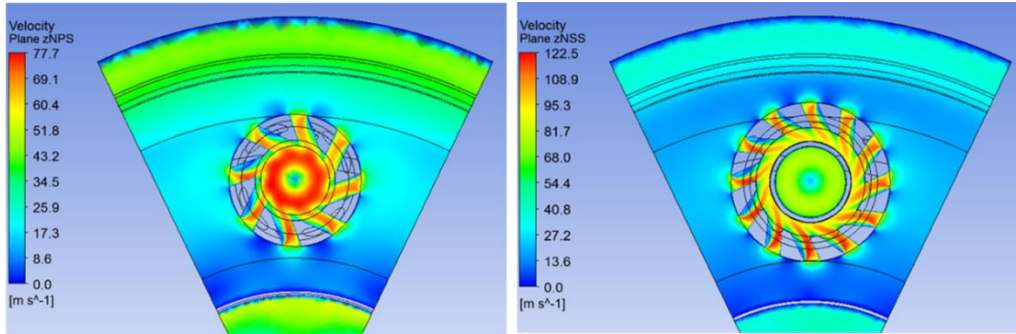
Ön tasarım çalışmalarıyla geometrisi oluşturulan yanma odasında HAD analizleri ile yanma odasında hedeflenen performans parametrelerine ulaştırılması hedeflenir. Bu kapsamda yanma verimi, basınç düşümü, yanma odası çıkış sıcaklığı gibi parametrelere bağlı olarak geometride değişikliklere gidilmektedir.

Kararlı bir yanma odası tasarımı için yanmanın en yoğun gerçekleştiği birincil bölgedeki geri sirkülasyon önem arz etmektedir. Bu geri sirkülasyonla yanmış sıcak gazlar ile kimyasal radikallerin tekrar yakıt püskürtücü çıkışına getirilmesiyle yakıt damlacıklarının buharlaşması ve tutuşması ile alev kararlılığı sağlanmaktadır. Bunun yanında yanmanın gerçekleşmesi için gerekli zamanın yaratılması da bu sayede sağlanmaktadır. Birincil bölgede oluşan geri sirkülasyon bölgesi Şekil 8'de gösterilmiştir.

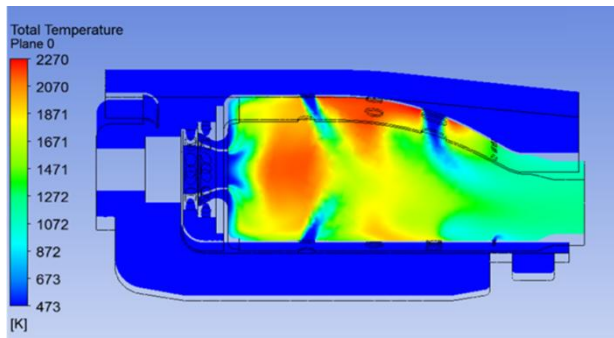


Şekil 8: Hız vektörleri

Birincil bölge tasarımında, yanma kararlılığı ve verimi açısından HAD analizlerinde üzerinde önemle durulması gerekmektedir. Birincil bölgede istenilen akış yapısının oluşmasında temel etkenler döngü üretici ve birincil hava delikleridir. Özellikle birincil ve ikincil döngü üreticilerindeki akış simetrisinin hava parçalama yakıt püskürtücü çıkışındaki akış düzenine doğrudan etki ettiği yapılan çalışmalarda net bir şekilde anlaşılmıştır. Şekil 9'da birincil ve ikincil döngü deliklerindeki hız konturları görülmektedir. Burada bir simetrisinin sağlanmış olması birincil bölgedeki akış karakteristiğinin istenen seviyede olmasını sağlamaktadır. Bu sayede Şekil 10'dan da görülebileceği gibi birincil bölgede düzgün bir alev bölgesi meydana gelebilmektedir.



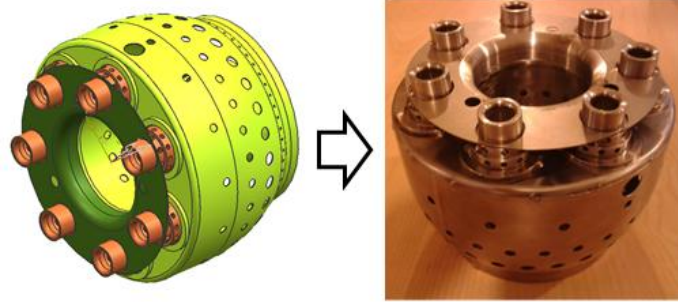
Şekil 9: Birincil ve ikincil döngü delikleri hız konturları



Şekil 10: Toplam sıcaklık konturu

## İmalat

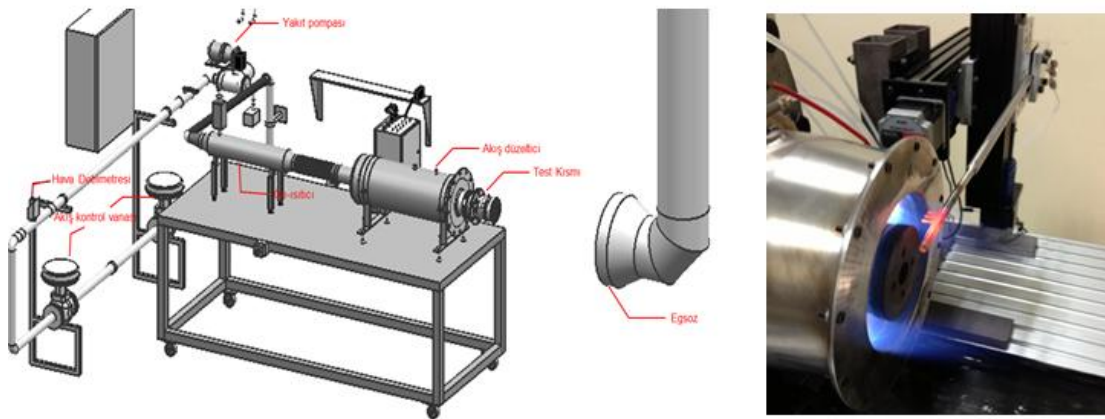
HAD analizleri çerçevesinde tasarımı şekillenen yanma odasının üretim modelleri hazırlanarak imalat prosesine geçilmektedir. Bu süreçte, dış ve iç gömleklere oluşan yüksek sıcaklıklara bağlı olarak Nikel alaşımı yüksek sıcaklığa dayanımlı malzemeler bu bölgelerde seçilmektedir (Şekil 11). Yanma odası gömleklerinin maruz kaldığı ısıl yüke bağlı olarak termal bariyer kaplama (TBD) uygulaması genel olarak görülebilmektedir. Süperalaşım üzerine uygulanan TBD'ler sayesinde ömür bakımından ciddi artışlar elde edilebilmektedir.



Şekil 11: Alev tüpü mekanik tasarım ve imalatı

## Test

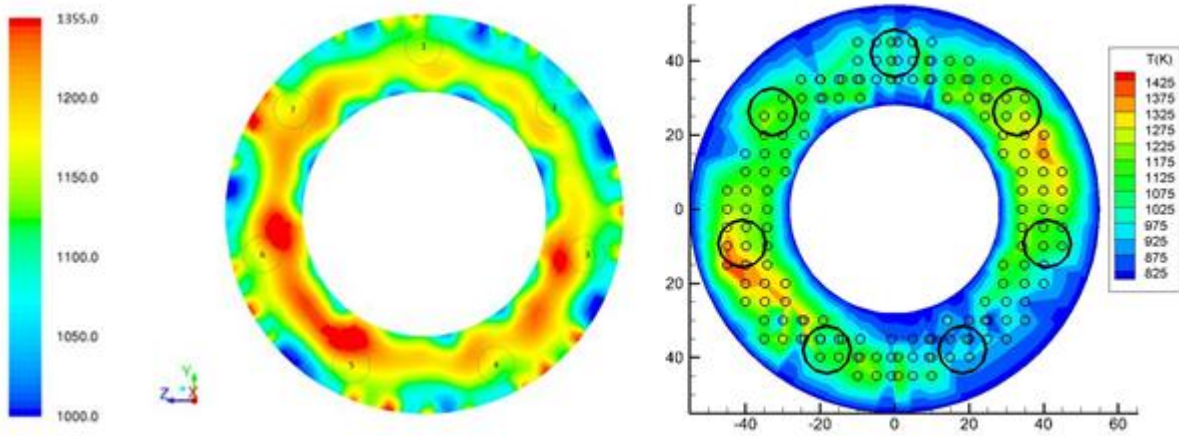
HAD analizleriyle eniyileştirilen yanma odası üzerinde rig test verileri çerçevesinde tasarımsal değişiklikler devam etmektedir. Yanma odası test süreci atmosferik ve yüksek basınç testleri olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Atmosferik testler, tasarım noktasını benzeştiren atmosferik koşullarda gerçekleştirilir ve tasarımsal iyileştirmeler bu safhada hayata geçirilir. Daha yüksek maliyete sahip, yüksek basınç riginde ise eniyileştirilmiş geometride performans doğrulama ve kararlılık testleri gerçekleştirilmektedir. Atmosferik bir test riginin genel yapısı Şekil 12'de verilmektedir.



Şekil 12: Yanma odası atmosferik test rigi

Yanma odası çıkışında çevresel olarak oluşabilecek yüksek sıcaklık bölgeleri özellikle türbin statoru açısından büyük risk yaratmakta ve malzeme deformasyonları oluşabilmektedir. Bu bakımdan tasarımı gerçekleştirilen yanma odasında çıkış sıcaklık dağılımının tespit edilmesi ve buna bağlı gerekli iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Çıkış sıcaklık dağılım ölçümü özel tasarlanmış ısı çift taraflarıyla test riglerde gerçekleştirilmekte olup radyasyon etkilerine bağlı olarak gerekli düzeltmeler yapılmaktadır. HAD analizleri ve testler neticesinde elde edilen yanma odası çıkış sıcaklık dağılımı Şekil 13'de görülebilir.

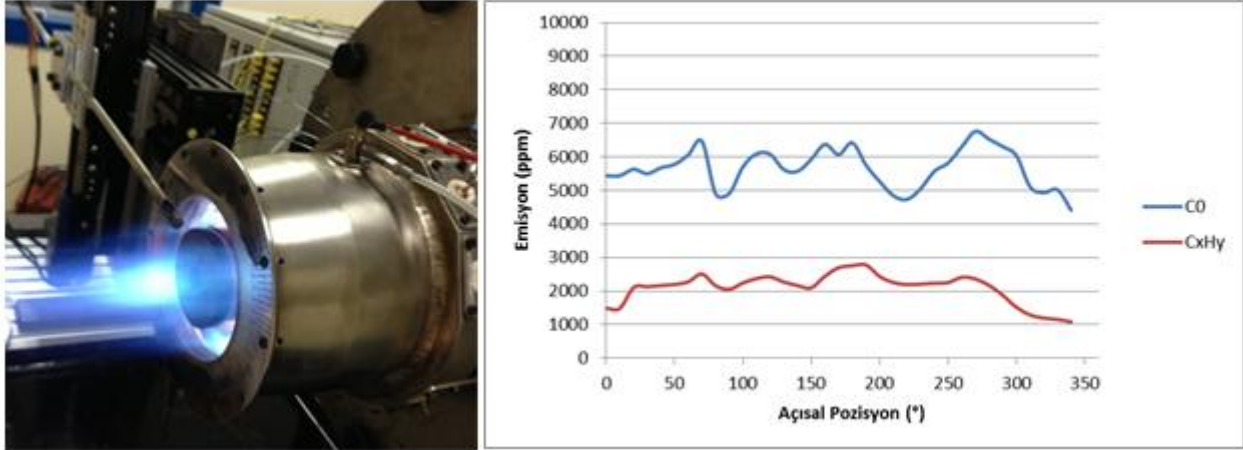




Şekil 13: Yanma odası çıkış sıcaklık dağılımı (HAD Analizi ve Test)

Çıkıştaki sıcaklık dağılımının ölçülmesi, yüksek sıcaklık bölgelerinin tespiti yanında ortalama sıcaklık değerinin hesaplanabilmesi açısından da önemlidir. Bu sayede; yanma odası yakıt debisi ve giriş sıcaklığı da kullanılarak yanma verimi değerlendirilebilmektedir.

Yanmanın tek bir yanma denklemine indirgenmesi ve bu denklemin emisyon verileri sonucunda çözümü yanma prosesinin daha detaylı incelenmesine imkan tanımaktadır. Çevresel etkiler açısından incelenmesi önemli olan emisyon verileri, aynı zamanda yanma verimini değerlendirmeye olanak tanıması bakımından da önemli bir yanma odası performans parametresidir. Şekil 14'de de görülebileceği üzere açısız lokasyona bağlı olarak farklılık gösteren değerler nedeniyle, verilerin bu nokta dikkate alınarak elde edilmesi gerekmektedir.

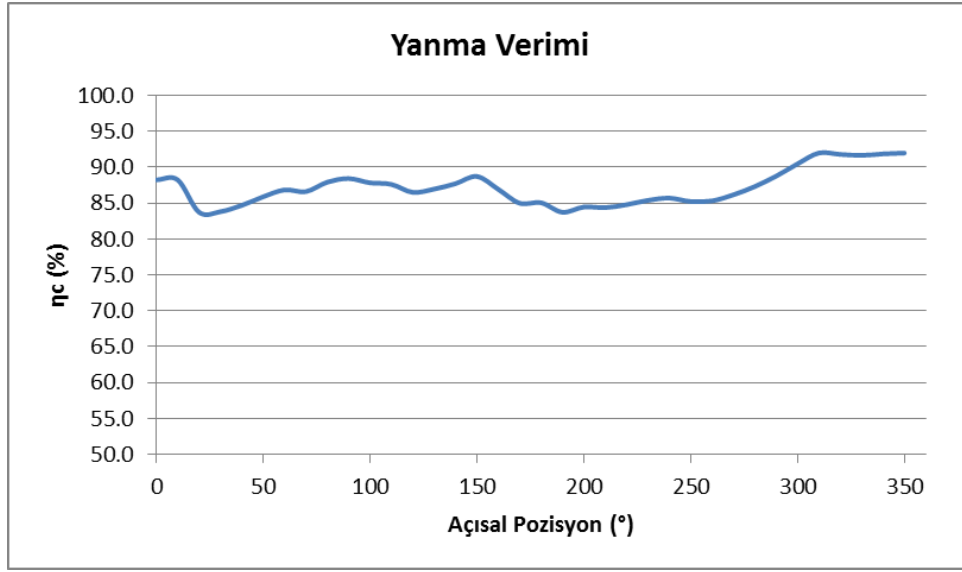


Şekil 14: Emisyon ölçüm düzeneği ve test verileri

Testlerde elde edilen CO ve C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> değerleri yanmadaki verimsizliğin göstergesi olup bu emisyon indeksi değerleri üzerinden yanma verimi hesaplanabilmektedir (Denklem (5)).

$$\eta_c = \left[ 1.00 - 10109 \frac{EI_{CO}}{LHV} - \frac{EI_{C_xH_y}}{1000} \right] \cdot 100 \quad (5)$$

Herbir açısall lokasyondaki emisyon indeks değęerlerine bağlı olarak hesaplanan yanma verimi Şekil 15'de gösterilmektedir. Emisyon indeks değęerlerindeki deęiŐime bağlı olarak yanma verimi de açısal lokasyona bağlı farklılık göstermektedir.



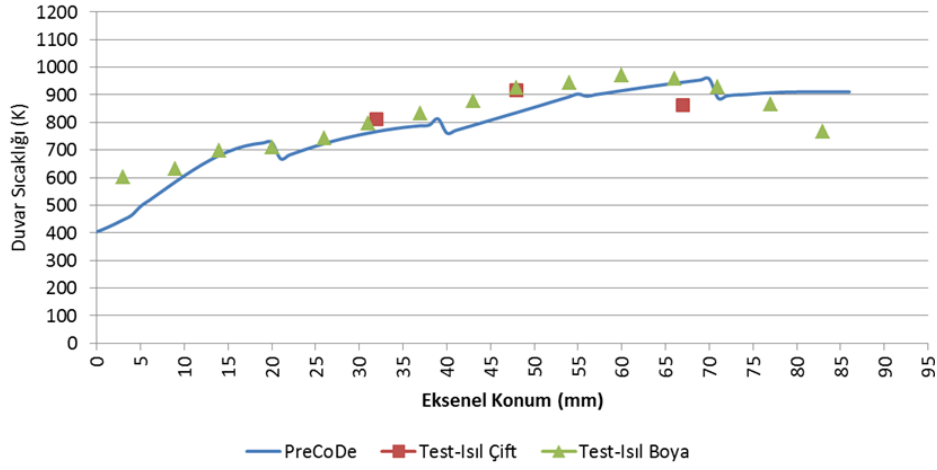
Şekil 15: Yanma verimi dağılımı

Gömlek metal sıcaklıklarının ısıll çiftler ile belirli noktalarında net bir Şekilde ölçülebilmesine rağmen tüm gömlek üzerindeki dağılımı gösterecek adette ısıll çift yerleŐtirmek mümkün değildir. Bu durum düşük hassasiyetlerine rağmen gömleğin tamamını değerlendirebilmeye olanak sağlayan ısıll boya uygulamasının gerçekleŐtirilmesini zorunlu kılmaktadır. ısıll boyalar, uygulama süresi ve maruz kaldığı sıcaklık değęerine bağlı olarak mevcut rengini deęiŐtirerek kalıcı bir renk dağılımı oluŐtururlar. Bu sayede yanma odası gömleklere üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını değerlendirmek mümkün olmaktadır (Şekil 16).



Şekil 16: Dış gömlek panoramik görüntüsü ve sıcaklık geçiŐleri

Testlerde elde edilen metal sıcaklık verilerinin hesaplamalarla kıyaslanması tasarım hesaplamalarının doğrulanması ve geliŐtirilmesini sağlamaktadır. Şekil 17'de bir yanma odasının dış gömleği üzerinde gerçekleştirilen teorik hesaplamalar ve test verilerinin kıyaslanması görülebilmektedir. Grafikten de değerlendirilebileceği üzere ön tasarım hesaplamaları metal sıcaklıklarının değerlendirilmesi bakımından etkin bir yöntemdir.



Şekil 17: Ölçülen çevresel ortalama ve 1B hesaplamalı gömlek sıcaklık dağılımı

## SONUÇ

Gaz türbinli yanma odalarının tasarım sürecine dair incelemelerde bulunan bu çalışmada kavramsal tasarım, ön tasarım, detay tasarım, imalat ve test süreçleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu kapsamda yanma odası ön tasarım sürecinde dikkate alınan temel performans parametreleri ve bu parametrelerin diğer tasarım fazlarında nasıl irdelendiği üzerine incelemelerde bulunulmuştur. Bu incelemeler çerçevesinde bakıldığında tüm süreçlerin birbirine bağlı olduğu ve her bir adımın önceki adıma geri beslemelerde bulunduğu net bir şekilde görülebilmektedir.

## Kaynaklar

Badarinath, C., *Development of Aero Gas Turbine Annular Combustor: An Overview*, Combustion group, GTRE, Bangalore, 1993

Boyce, M. P., *Gas Turbine Engineering Handbook*, 2nd Edition, Gulf Professional Publishing, 2002

Lefebvre, A. H., *Gas Turbine Combustion*, Taylor & Francis, New York, 1999

Murthy, J. N., *Gas Turbine Combustor Modelling for Design*, Ph.D Thesis, Cranfield Institute of Technology, School of Mechanical Engineering,, Cranfield, 1988

Pugh, S., 1990, *Total Design*, Addison Wesley Publishers, Wokingham, England.

SAE Aerospace, *Aerospace Recommended Practice, ARP1533, Procedure for the Analysis and Evaluation of Gaseous Emissions from Aircraft Engines, Rev. A*, 2004

Sanborn, J. W., Lenertz, J. E., Johnson, J. D., “Advanced Turbofan Engine Combustion System Design and Test Verification”, *Joint Propulsion*, Vol. 5, No. 4, 1989